

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

Zefektivnění výroby elektrod pro elektroerozivní obrábění  
Reengineering of Electrode Production for Electroerosive  
Machining

Student:	Bc. Michal Borkovec
Vedoucí diplomové práce:	doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Ostrava 2013

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Michal Borkovec**

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2303T002 Strojírenská technologie

Téma:

**Zefektivnění výroby elektrod pro elektroerozivní obrábění**  
**Reengineering of Electrode Production for Electroerosive Machining**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Možnosti obrábění těžkoobrobitelných materiálů.
3. Návrh technologie výroby vybraného představitele.
4. Návrh vhodných strojů a nástrojů.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] ZAJAC, Jozef; JURKO, Jozef; ČEP, Robert. *Top trendy v obrábění, II. část – Nástrojové materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.
- [5] VASILKO, Karol; HAVRILA, Michal; MARCINCIN-NOVÁK, Jozef; MÁDL, Jan; ZAJAC, Jozef. *Top trendy v obrábění, III. část – Technologie obrábění*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 214 s. ISBN 80-968954-2-7.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



Ing. et Ing. Mgr. Jana Petru, Ph.D.  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě 10.5.2013

Michal Bozkov  
.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 10.5.2013

  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Michal Borkovec

Adresa trvalého pobytu autora práce: T.G.M. 162, 563 01 Lanškroun

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BORKOVEC, M. *Zefektivnění výroby elektrod pro elektroerozivní obrábění: diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2013, 47 s. Vedoucí práce: Čep, R.

Diplomová práce se zabývá zefektivněním výroby elektrod pro elektroerozivní obrábění. Byla realizována ve firmě INA Lanškroun, s.r.o. Řeší výrobu elektrod z grafitu, mědi a slitin mědi s wolframem. Je zde popsána technologie výroby s využitím frézovacích nástrojů Inova Tools a obráběcích center Röders. V úvodu je popsána obecná problematika a obrobitelnost jednotlivých materiálů. Podstatná část je věnována možnostem optimalizace výroby – kalibraci stroje, volbě nové vysokorychlostní CNC frézky a vysokorychlostních nástrojů a také celkovému uspořádání výroby. Závěrem práce je zjištění, že optimálního řešení zřejmě dosáhneme využitím kalibračních systémů a celkovým uspořádáním výroby s ohledem na zkrácení výrobních časů.

## ANNOTATION OF THE MASTER THESIS

BORKOVEC, M. *Reengineering of Electrode Production for Electroerosive Machining: Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2013, 47 p. Thesis head: Čep, R.

This thesis deals with streamlining the production of electrodes for EDM. Was carried out at INA Lanškroun, Ltd. Addresses the production of graphite electrodes, copper and copper alloy with tungsten. It describes the technology of using milling tools Inova Tools and machining centers Röders. The introduction describes general issues and machinability of materials. A substantial part is devoted to the possibilities of optimizing production - machine calibration, select the new high-speed machining center and high-speed CNC milling tools, as well as the overall organization of production. Conclusion of the work is that the optimal solution will apparently using the calibration systems and the general layout of production with a view to reduce production times.

## Obsah

0. Úvod .....	8
1. Obecná charakteristika daného problému .....	9
1.1 Popis podniku a výroba .....	9
2. Problematika obrábění elektrod pro elektroerozivní hloubení .....	11
2.1 Všeobecná charakteristika .....	11
2.1.1 Materiály elektrod .....	11
2.1.2 Měď .....	12
2.1.3 Grafit .....	13
2.1.4 Slitina wolframu s mědí .....	14
2.2 Obrobitelnost materiálů elektrod .....	16
2.2.1 Využití HSC frézování .....	16
2.2.2 Obrobitelnost mědi .....	17
2.2.3 Obrobitelnost grafitu .....	19
2.2.4 Obrobitelnost sloučenin wolframu a mědi .....	20
3. Výroba elektrod v podniku .....	21
3.1 Technologie výroby .....	21
3.2 Programování obrábění .....	22
3.3 Materiál a polotovar .....	23
3.4 CNC frézování .....	25
3.4.1 Vysokorychlostní obráběcí centra .....	25
3.4.2 Vysokorychlostní obráběcí nástroje .....	28
4. Diskuse experimentu .....	29
4.1 Stávající technologie .....	29
5. Možnosti zefektivnění výroby .....	32
5.1 Kalibrace stroje .....	34
5.2 Volba nové moderní CNC vysokorychlostní frézky .....	36
5.3 Volba nástrojů vzhledem k obrobitelnosti .....	38
5.4 Celkové uspořádání výroby .....	40
6. Zhodnocení možných nových řešení výroby .....	42
7. Závěr .....	43
8. Seznam použité literatury .....	44
9. Seznam příloh .....	46

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
ap	mm	hloubka řezu
bcc		body-centered cubic – prostorově centrovaná kubická mřížka
CAD/CAM		Computer Aided Design/Komputer Aided Manufacturing- počítačová podpora konstruktéra/díleenské činnosti
CNC		computer numeric control/počítačově řízené stroje
ČSN		Česká státní norma
d	mm	průměr frézy
DIN		Deutsches Institut für Normung – Německý ústav pro průmyslovou normalizaci
E	Pa	modul pružnosti v tahu
EDM		<i>Electric Discharge Machinig</i> – Elektrojiskrové obrábění
F	N	řezná síla
fcc		face-centered cubic – plošně centrovaná kubická mřížka
fz	mm	posuv na zub
HB		tvrdost podle Brinella
HPC		high performance cutting - vysokovýkonné obrábění
HSC		high speed cutting - vysokorychlostní obrábění
NC		numeric control - číslicově řízené stroje
n	min <sup>-1</sup>	otáčky vřetena
P	W	mechanický výkon
PKD		polykrystalický diamant
PPD		primární plastická deformace
Ra	μm	průměrná aritmetická úchylka povrchu posuzovaného povrchu
Re	MPa	mez kluzu materiálu
Rm	MPa	mez pevnosti materiálu
Rz	μm	výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů
SPD		sekundární plastická deformace
T	N	třecí síla
tas	min	čas jednotkový strojní
v <sub>c</sub>	m.min <sup>-1</sup>	řezná rychlost
VA		interní označení pracoviště elektroerozivního hloubení
v <sub>f</sub>	mm.min <sup>-1</sup>	rychlost posuvu
v <sub>1</sub>	m.min <sup>-1</sup>	rychlost odcházející třísky
Z		počet zubů
ε		poměrné délkové prodloužení
σ	Pa	mechanické napětí

## 0. Úvod

V současné době je ve strojírenském průmyslu uplatňována tendence spočívající ve snižování výrobních časů, zvyšování kvality a přesnosti výroby. Tvarová složitost se neustále zvyšuje. S ohledem na vlastnosti konečného výrobku se používají materiály, které disponují vlastnostmi jako jsou vysoká pevnost, tvrdost, otěruvzdornost.

Používají se i nové metody obrábění, k nimž patří nekonvenční metody, mezi které řadíme i elektroerozivní obrábění. Tato technologie se uplatňuje při obrábění těžko obrobitelných materiálů, při výrobě lisovacích a střížných nástrojů a při výrobě tvarově složitých součástí. Základem elektroerozivního obrábění je mít k dispozici vyrobený vhodný nástroj optimální jakosti a kvality. Z hlediska efektivity je podstatné zvolit vhodnou technologii výroby, vybrat vhodný obráběcí stroj, nástroje a materiál elektrody. Zkrácením průběžné doby potřebné pro modelování, programování a vyrobení elektrod se zkrátí celková doba potřebná k výrobě formy.



## 1. Obecná charakteristika daného problému

Diplomová práce je zhotovena ve firmě INA Lanškroun, s.r.o. V této firmě se zabývají výrobou součástí pro automobilový a strojírenský průmysl a také pro leteckou a kosmickou dopravu. Hlavním úkolem je zefektivnění výroby elektrod pro elektroerozivní obrábění, frézovaných na vysokorychlostních obráběcích centrech Röders z materiálů mědi, grafitu a wirbalitu. Jedná se o kusovou výrobu nástrojů, při které se naskýtají různé problémy jak z hlediska technologie výroby, tak z hlediska určování časových norem a pracnosti výroby.

### 1.1 Popis podniku a výroba

Schaeffler CZ s. r. o., patří do skupiny Schaeffler Group. Skupina se značkami INA, LuK a FAG disponuje portfoliem produktů, které patří k nejrozsáhlejším v ložiskové výrobě a může pokrýt všechny oblasti použití. Společný katalog standardních ložisek obsahuje více než 40 000 typů, které jsou dodávány do 60 různých oblastí průmyslu.

Úspěšný vývoj INA a FAG začal dvěma geniálními myšlenkami: Dr. Georg Schaeffler, který společně se svým bratrem Wilhelmem založil roku 1946 v Herzogenaurach společnost INA, vyvinul v roce 1949 jehlovou klec. Tato průkopnická inovace přinesla jehlovým ložiskům, jako vysoce přesným, výkonným a spolehlivým dílem široké uplatnění v průmyslu. Friedrich Fischer vynalezl roku 1883 ve Schweinfurtu brousící stroj na kuličky a odstartoval tím úspěšnou historii FAG v průmyslové výrobě ocelových kuliček. Od roku 2001 patří FAG do skupiny Schaeffler Group.



INA disponuje vlastním know-how beztriskové výroby přesných výrobků. To umožňuje přesnou výrobu ve velkých sériích – s vynikajícím poměrem ceny k výkonu. INA se vypracovala na vedoucí pozici ve výrobě motorových komponentů.

Společnost Schaeffler Group se svými třemi silnými značkami INA, LuK, a FAG prosazuje vyslovenou orientaci na zákazníky, inovační sílu a maximální kvalitu. Celosvětově na 76 tisíc zaměstnanců vytvořilo v roce 2011 ve 180 závodech a v 50 zemích obrat přesahující 10,7 miliardy Euro.

K dalším faktorům úspěšnosti náleží nejvyšší kvalita, orientace na zaměstnance, příkladná ochrana životního prostředí a neustálý dlouhodobý vývoj podnikání.

Společnost INA Lanškroun, s.r.o. byla založena 1. Července 1999 v prostorách bývalé nástrojárny ALEMY vzniklé privatizací předchozí TESLY. Je součástí koncernu INA Schaeffler Group se sídlem v Německu v Herzogenaurachu. Hlavním výrobním

programem je výroba ložisek, valivých vedení a hydraulických prvků pro automobilový a letecký průmysl. INA Lanškroun, s.r.o. představuje v rámci koncernu především servisní závod včetně konstrukce zajišťující výrobu kombinovaných nástrojů, náhradních dílů, plastových výlisků, jednoúčelových strojů a vstřikovacích forem. V současné době zaměstnává 438 pracovníků. Díky silnému zahraničnímu vlastníkovi je INA Lanškroun, s.r.o. stabilní, perspektivní firmou a jednou z největších a nejlépe vybavených firem v oboru specializovaných nástrojů.[21]



Obr. 1: Budova firmy INA Lanškroun, s.r.o. [21]



Obr. 2: Pohled do nástrojárny [21]

## 2. Problematika obrábění elektrod pro elektroerozivní hloubení

### 2.1 Všeobecná charakteristika

Elektrody slouží jako nástroj pro CNC elektroerozivní stroje. Jsou to výrobky z mědi či grafitu, které mají negativní tvar oproti tvaru formy. Elektroerozivním hloubením se "otiskne" tento negativní tvar do ocelové části formy (tvarové vložky). Tak vznikne správný, žádaný tvar. Pro výrobu různých forem jsou zapotřebí různé elektrody lišící se tvarem i velikostí. Jejich počet se pro jednu formu pohybuje od několika kusů až po několik desítek či stovek kusů (350 ks). Rychlost, s jakou jsou elektrody vyráběny, přímo úměrně ovlivňuje celkovou dobu výroby formy. Zkrácením průběžné doby potřebné pro modelování, programování a vyrobení elektrod se zkrátí celková doba potřebná k výrobě formy.

Před několika lety byl proces výroby elektrod zproduktivněn zavedením upínacích přípravků firmy Erowa, které standardizovaly upínání elektrod na všech strojích, jež se podílely na jejich výrobě. Tím se několikanásobně snížily časy potřebné pro upnutí a vystředění obrobku a zároveň bylo zajištěno velmi přesné opakované upnutí. Zůstaly však problémy s organizací a vzájemnou komunikací jednotlivých pracovišť. A právě ty bylo rozhodnuto odstranit. Při výběru vhodného řešení zvítězila nabídka firmy Zwicker Systems, s. r. o., která navrhla řešení pro automatizaci výroby elektrod a jejich použití s vazbou na CAD/CAM pracoviště Unigraphics, která firma Ronas využívá k modelování a programování elektrod.[18]

#### 2.1.1 Materiály elektrod

Materiál elektrody má mít vysokou elektrickou vodivost, dobrou obrobiteľnosť, vysoký bod tavení a dostatečnou pevnost, aby se elektroda při vlastní práci nedeformovala. Výběr materiálu je ovlivňován výslednou požadovanou jakostí povrchu a efektivností pracovního procesu a volbou nejvhodnějšího materiálu nástrojové elektrody pro daný druh obrábění. Jako nejrozšířenější materiály elektrod se používají měď, slitina 50 – 80 %W, 20- 50 % Cu, tzv. wolframová měď, mosaz, Al slitiny, ocel, wolfram, grafit.

Zpočátku se jako materiál pro výrobu elektrod používala měď, grafit se dostal ke slovu přibližně o třicet let později. S ohledem na stále sofistikovanější generátory pulzů v elektroerozivních hloubičkách však dnes jeho použití převažuje. Grafitové elektrody připouštějí vyšší proudovou hustotu, mají menší hmotnost, méně se opotřebovávají, nemění své vlastnosti během erodování a ve srovnání s mědí se lépe obrábějí. Nevýhodou grafitu je, že zůstane-li déle v zápalu, elektroda se odpařuje a znečišťuje hloubicí stroj.[3]

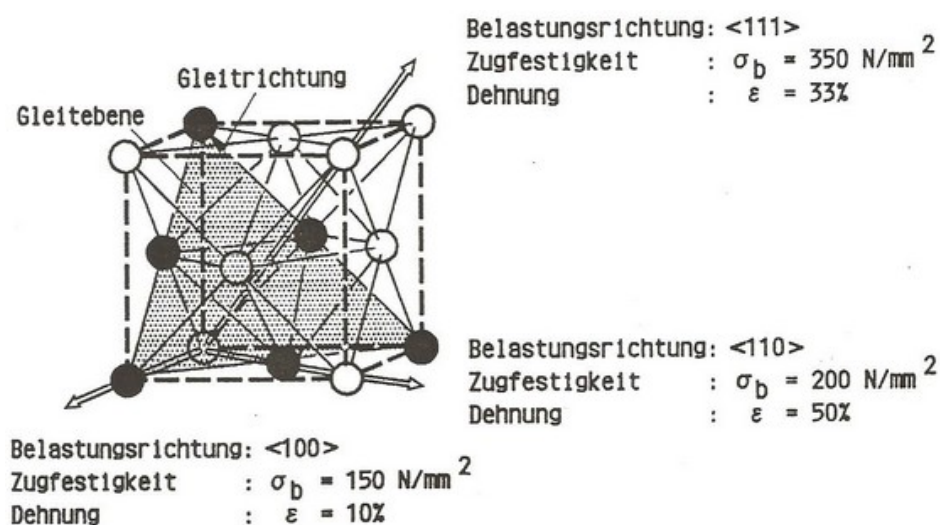
### 2.1.2 Měď

Tento materiál vyniká dobrou elektrickou vodivostí, dobrou odolností proti erozivnímu opotřebení, dobrou obrobitelností, velkým úběrovým výkonem při středním opotřebení nástrojové elektrody. Nástrojové elektrody z mědi jsou schopny obrábět veškeré karbidy. Jsou používány pro výrobu tvarových dutin z ocelí, korozivzdorných ocelí, wolframových karbidů a pro dokončovací operace s průměrnou drsností pod  $0,5 \mu\text{m}$ .

Měď získáváme pražením sulfidových rud a následnou redukcí vzniklého oxidu uhlím, nebo sulfatačním pražením převádíme sulfid na sulfát, ze kterého se měď vylučuje pomocí železa.

Chudé měděné rudy se louhují v kyselině sírové nebo v roztoku síranu železitého. Měď přejde do výluhu jako síran měďnatý, ten se zpracovává cementací železem nebo elektrolyticky.

Vyrobená surová černá měď dosahuje čistoty 94-97 % a musí se dále rafinovat. Rafinace surové mědi se provádí přetavováním za přídavku dřevěného uhlí. Vzniklá rafinovaná hutní měď má čistotu 99,7 %. Dokonalejší rafinace mědi se dosahuje pomocí elektrolýzy v síranovém prostředí. Elektrolytická rafinovaná měď dosahuje čistoty až 99,95 %. Měď tvoří kubickou plošně centrovanou krystalickou mřížku. Na rozdíl od jiných kovových materiálů nevykazuje krystal mědi žádné změny mřížky při zvýšených teplotách. Měděný kov, právě tak jako většina krystalických materiálů vykazuje silnou anizotropii, která se vyznačuje vysokým anizotropním faktorem. Pozoruhodně se to projevuje obzvláště u silně směrově závislých molekul. Při pokusu u vzorku čisté mědi klesala hodnota meze pevnosti v jednoosých tahových zkouškách ze 350 MPa v tahové směru  $\langle 111 \rangle$ , přes 200 MPa v tahové směru  $\langle 110 \rangle$  až na 150 MPa ve směru tahu  $\langle 100 \rangle$ .



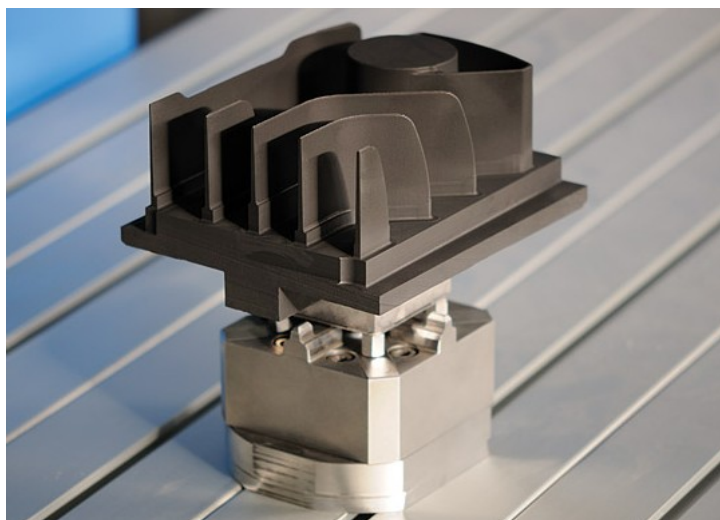
Obr.3: Mez pevnosti v jednotlivých tahových směrech [2]

### 2.1.3 Grafit

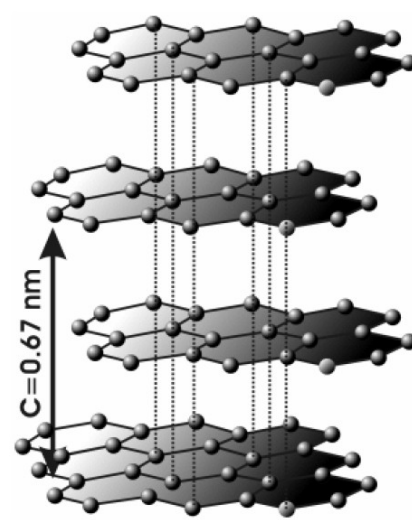
Grafit, dříve nazývaný jako tuha se skládá z vrstev, které jsou tvořeny uhlíky navázanými do šestiúhelníků. Na každý uhlík jsou vázány kovalentně další tři uhlíky. Jednotlivé vrstvy spolu drží pouze pomocí slabých interakcí tzv. van der Waalsovy síly. Této vlastnosti se využívá např. při výrobě tužek, kde mletá tuha tvoří základní složku tyčinky určené pro psaní a kreslení. Jedny z největších grafitových dolů se nalézají v USA (Texas a stát New York), Mexiku, Indii a Rusku; významná byla i ložiska v jižních Čechách. Grafit je zároveň složkou sazí, které vznikají spalováním fosilních paliv. Je přítomen v částech natolik nepatrných rozměrů, že saze mají spíše vlastnosti amorfního uhlíku. Další významné uplatnění grafitu je v metalurgickém průmyslu. Vzhledem k jeho značné tepelné odolnosti se z něho vyrábějí nádoby, tzv. *kokily*, do kterých se odlévají roztavené kovy a jejich slitiny. Zamezí se tak kontaminaci slitiny kovem, ze kterého by se kokila musela vyrobit. Z grafitu se vyrábějí i elektrody pro elektrolytickou výrobu. Také se z něj vyrábějí kartáčky elektromotorů. Slouží i jako součást maziv (grafitová vazelína, kolomaz).

Význam grafitu spatřujeme při výrobě elektrod pro elektroerozivní obrábění, a to při jeho specifických vlastnostech opotřebení při průchodu elektrického proudu, při hrubovacích procesech (1%), tak ve fázi dokončování (5 – 10%). Srovnáváme-li tento materiál s mědí, zjišťujeme, že při průchodu proudu o slabé intenzitě vykazují oba materiály víceméně stejné opotřebení. Při zvýšené intenzitě proudu se opotřebení mědi zvyšuje, zatímco grafitu ubývá jen do určité hodnoty proudu. Z časového hlediska se u obou materiálů opotřebení snižuje v závislosti na čase. U grafitu zjišťujeme vždy menší opotřebení, než je tomu u mědi. Při zkracování intervalu mezi výboji se opotřebení snižuje, grafit vykazuje opět nižší opotřebení než měď. Grafitu se tedy dává přednost před mědí, pokud se po elektrodě vyžaduje více otisků. Používá se především, pokud se vyžaduje drsnost povrchu Ra 0,8, u elektrod složitějších tvarů a v případě, kdy se požadují velké rozměry, které se obtížně vyrábějí z mědi, nebo by byla jejich výroba velice nákladná. S elektrodami z grafitu se také snadněji manipuluje díky tomu, že jsou podstatně lehčí než měděné. Na rozdíl od mědi se grafit nedoporučuje pro práce s těžkými kovy a obecně s karbidy. Je podstatné, že získání perfektních elektrod, bez jakýchkoli anomálií v průběhu práce, závisí na kvalitě samotného grafitu. Pro víceúčelové použití je EDM-200, který je vhodný pro hrubování i dokončování, vykazuje vysokou odolností hran. Grafit EDM-1 je zvláště doporučován pro dokončovací práce, díky optimální odolnosti vůči opotřebení. Každá typologie se dodává v celých blocích, v dělených blocích a při specifických žádostech v požadovaném rozměru.[5]





Obr.4: Příklad grafitové elektrody [5]



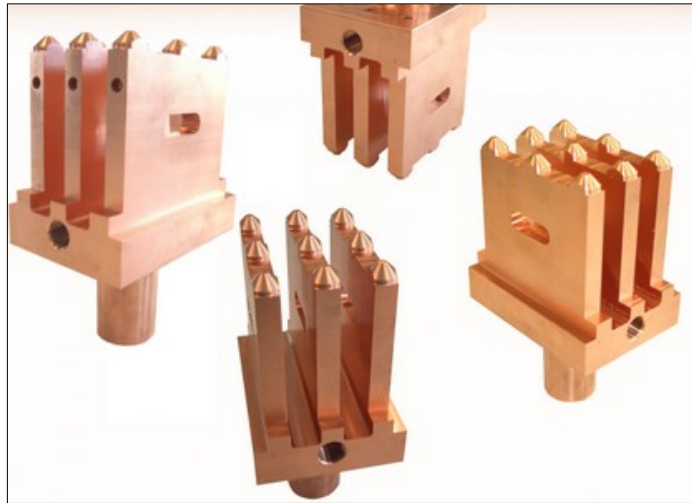
Obr.5: Struktura grafitu [5]

#### 2.1.4 Slitina wolframu s mědí

Wolfram se vyznamenává mezi všemi kovy nejvyšším bodem tání při teplotě 3410 °C. Dobrá elektrická vodivost, vysoké hodnoty tvrdosti a pevnosti jsou vlastnosti, které určují jeho použití pro nejrůznější účely použití. Je však třeba pamatovat na to, že se wolfram v kyslíkaté atmosféře rozkládá při teplotách nad 500 °C za tvorby kyslíčků wolframu. Podmíněno vysokým bodem tání, je odolnost proti odhořívání jiskrami a obloukem v elektrickém provozu nebo jako elektroda nesoucí světelný oblouk, velmi vysoká. Pro svoji vysokou termickou zatížitelnost (rekrytalizační teplota 1200 °C) se hodí na odporové topné prvky, odpařovací lodičky a rentgenové anody.

Sintrovaný materiál wolfram-měď se vyrábí zejména s obsahem wolframu/mědi 80/20, 75/25 a 90/10 (hmot.%). Nejdůležitější vlastnosti slitiny wolfram-měď jsou vysoká odolnost vůči opalu, dobrá elektrická vodivost, vysoká tepelná vodivost, velmi nízká schopnost tvořit slitiny, dobrá zpracovatelnost. Elektrody se používají pro elektrojiskrové obrábění, elektrochemický úběr, odporové svařování, kontakty pro elektronickou spínací techniku. V práškové metalurgii se tvarování kovů nedosahuje tavením, ztuhnutím a následným mechanickým opracováním, nýbrž kovové prášky se mísí, lisováním jsou převáděny do požadovaných tvarů a sintrují se. Sintrování - ohřívání pod bod tání - lze chápat jako děj řízený difúzí, při kterém se styčné plochy částíček prášku vyvinou v hranice zm. Přednosti práškové metalurgie spočívají mimo jiné v tom, že se volbou prášku a vhodným zpracováním dá dosáhnout struktura, která odpovídá určitým fyzikálním požadavkům. Tak lze vysoce jemnou strukturou dosáhnout kvaziizotropie, která usnadňuje zpracování kovu při vyšších teplotách. Z toho důvodu mají např. práškovou metalurgií vyrobené wolframové tyče převahu nad wolframovými tyčemi, tavenými elektronovým paprskem.

Kombinované kovy - těsné směsi kovů, které netvoří slitiny - se dají vyrobit práškově metalurgickou cestou. U kombinovaných kovů se dají vyvinout aditivním chováním vlastností komponent zcela směrované charakteristiky pro určitý účel použití.[20]



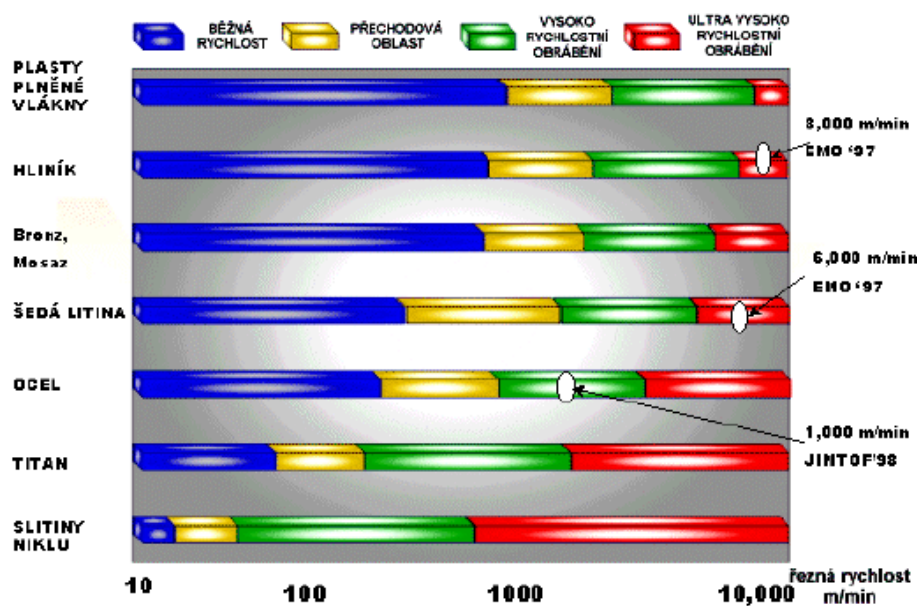
Obr.6: Příklad elektrody ze slitiny wolframu a mědi [20]

Porovnání mechanických a fyzikálních vlastností					
Materiál nástrojové elektrody	Měď	Slitina W80%Cu20%	Slitina W90%Cu10%	Grafit	
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	250 – 310	550 - 600	480 – 580	130	
Mez kluzu $R_p$ [MPa]	60	400	450	-	
Tvrdost Hb	70 - 95	200 - 240	290 – 310	80 - 150	
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	8,96	15,6	17,3	1,6-2,1	
Tepelná vodivost [W/m.K]	386	140	160	119-165	
Elektrická vodivost [S/m]	$6,07 \cdot 10^7$	$2,3 - 2,9 \cdot 10^7$	$2,3 - 2,9 \cdot 10^7$	$6,1 \cdot 10^4$	
Měrný elektrický odpor [ $10^{-6} \cdot \Omega \cdot m$ ]	0,0169	0,050	0,05	60	

## 2.2 Obrobitelnost materiálů elektrod

### 2.2.1 Využití HSC frézování

HSC technologie zahrnuje kromě vlastního vysokorychlostního obrábění i tzv. suché a tvrdé obrábění. Suché obrábění sleduje vyloučení nebo minimalizaci užití procesních kapalin a redukci nákladů na jejich filtraci a recyklování. Tvrdé obrábění znamená obrábění kalených ocelí a jiných velmi tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu náhradou za dříve užívanou technologii broušení. Nejedná se pouze o zmíněnou extrémně vysokou řeznou rychlost, ale také o vysoké rychlosti posuvů. Jde o vysoce výkonné obrábění, při kterém se dosahuje velkých objemů obrobeného materiálu za časovou jednotku tzv. úběrů. Nelze říci, že konvenční obrábění přechází do oblasti vysokorychlostního obrábění od určité hodnoty řezné rychlosti, bez ohledu na ostatní podmínky vytvářející řezný proces. Těmito podmínkami je myšlen jednak způsob obrábění a především druh obráběného materiálu, který je zejména tím rozhodujícím faktorem určujícím příslušnou velikost řezné rychlosti. Řezné rychlosti, při kterých lze dané materiály obrábět tak, aby byla dosažena přijatelná trvanlivost břitu, jsou velmi rozdílné. Řezná rychlost výrazně ovlivňuje to, jestli obráběný materiál bude tvořit plynulou nebo článkovitou třísku. Vysokou řeznou rychlost při obrábění určitého materiálu lze také definovat jako takovou řeznou rychlost, při které se v celé oblasti primární plastické deformace vytváří pouze lokalizované smyky bez intenzivní plastické deformace. V případě velmi těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou titan, nikl a jejich slitiny, se někdy dává přednost spíše pojmu výkonové obrábění, než pojmu obrábění vysokými řeznými rychlostmi, to proto, aby se zdůraznily reálné řezné podmínky.[7]

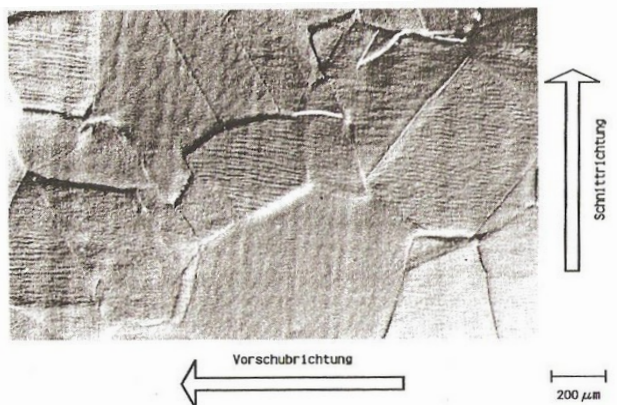


Obr.7: Rozsahy řezných rychlostí pro jednotlivé druhy materiálů [7]



### 2.2.2 Obrobitelnost mědi

Zvláštní problémy vznikají u procesu jemného frézování kvůli nutnosti pracovat se šikmým řezem, který je podstatně menší než střední řez jádrem polykrystalické mědi. Z tohoto důvodu může být řezný proces pokládán z technologického hlediska jako za sebou řazené obrábění rozdílně orientovaných monokrystalů. Jelikož jsou elastické a plastické materiálové vlastnosti monokrystalu závislé na jeho orientaci, dochází nevyhnutelně ke změně podmínek řezu na hranici jádra. Tyto rozdílné obráběcí vlastnosti způsobují typický, též známý z literatury, snímek povrchu.



Obr. 8: Materiálem podmíněné znaky povrchu jemně frézovaného vzorku mědi [2]

Znatelně viditelné jsou rozdílné struktury na monokrystalech a také ostré vymezení na hranicích zrn. Tyto jsou způsobeny místními vyvýšeninami právě na těchto hranicích zrn a také nerovnostmi mezi sousedícími zrny materiálu. Další, zde však podřadnou, vlastností povrchu jsou viditelné stopy řezů nástrojem. Tyto uvedené známky drsnosti lze rozdělit do dvou kategorií:

#### 1. Drsnosti způsobené řezacím pohybem ostří a též překrývajícími relativními pohyby

Pod tím se rozumí nejen kinematická drsnost povrchu, trhliny v řezací hraně, ale také modulace povrchu způsobená dynamickým chodem stroje. Nakonec je třeba rozlišit mezi podnětem způsobeným strojem nebo dynamikou řezací síly zapříčiněnou kvalitou materiálu.

#### 2. Efekty drsnosti vyvolané strukturou materiálu :

- místní převýšení na hranicích zrn
- výškové rozdíly mezi sousedními krystaly materiálu
- linie skluzu, omezené na monokrystaly materiálu

Účinky související s materiálem, na nichž závisí převážně zpracování povrchu, ozřejmují, že k porozumění průběhu procesu jemného obrábění je velice důležité detailně řešit relevantní vlastnosti materiálu. K nim patří především elastické vlastnosti, dále též

hodnoty popisující plastické chování materiálu při tvarování.

Pro vzorky z měděných materiálů byly provedeny zkoušky technologických vlastností. Při všech zkoumaných materiálech bylo možné zvýšit rychlost řezu o 5% až 20%, tím pak objem obrábění zvětšit, a podstatně snížit čas opracování. Obzvláště při špatně obrobitelných měděných materiálech se sklonem k ulpívání tím může být hospodárnost značně zlepšena.

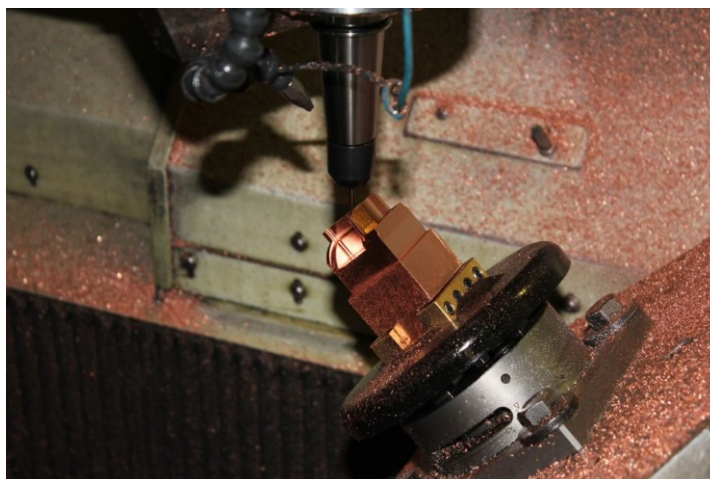
U těžko obrobitelných materiálů náchylných k ulpívání, jako je čistá měď nebo alpaka, se osvědčil jako řezný materiál polykrystalický diamant nejen v lepší otěruvzdornosti, ale také na základě příznivějších koeficientů tření, ve vyšší kvalitě povrchu a nižších silách frézování. Keramické řezací materiály se pro svojí lepidlost nehodí.

Řezná geometrie pro vysokorychlostní frézy je jen u automatových slitin shodná s těmi pro konvenční frézování. U ostatních měděných materiálů je třeba zvětšit úhel hřbetu a sice tím více, čím měkčí a silněji náchylnější je materiál k ulpívání. Při měkkých materiálech by měl být řezací klín pokud možno o rádiu ostří ( $r = 15 - 20 \mu\text{m}$ ). Zvýšením řezné rychlosti vede obvykle ke zlepšení podmínek obrábění způsobených snížením třecích koeficientů a k nižším drsnostem povrchu.

Defekty, které vznikají v řezné ploše při nižších řezných rychlostech nesouvislým opracováním, se již nevyskytují. Zamezení těchto defektů má pozitivní vliv na následné povrchové úpravy a životnost stavebních prvků při tribologickém, leptavém a vibračním zatížení. Při optimální geometrii řezu, řezné a posuvové rychlosti nedochází k žádnému narušení povrchu nalepenými třískami nebo jejich částicemi. Dosažitelná dobrá kvalita povrchu (při  $R_a \approx 0,2 \mu\text{m}$ ,  $R_z = 1,5 \mu\text{m}$  u hloubky řezu  $a_e = 1,5 \text{ mm}$ ) způsobuje v mnoha případech, že je zbytečný přídavný dokončovací průchod.

Suchý řez je v mnoha případech možný. Použité studené maziva zlepšují kvalitu povrchu. Vzhledem k malému E-modulu mědi je třeba použít nižší síly řezu, aby bylo zabráněno deformacím zejména u tenkostěnných výrobků. Další výhoda vysokých rychlostí řezu je pokles běžných řezných sil.

Tvorba třísek závisí na způsobu obrábění a řezné rychlosti. Při plynulém obrábění (čistá měď, cínový bronz, mosaz) klesá pěchování třísek a tím přetvoření vynaložené práce pomocí zvětšení úhlu stříhu. Pokud jde o běžný rozsah obrábění (automatové slitiny, hliníkové bronzy) není pozorován žádný úbytek řezných sil. Utváření třísek má vliv dále na zbytková napětí. Smykové deformace v řezací zóně byly zjištěny jako rozhodující veličina vlivu na rozsah a stav maxima tažného napětí pod povrchem. Vliv rychlosti řezu spočívá méně na tepelných vlivech než na změnách tvarové pevnosti kujné mědi. Při vysokorychlostním frézování, především při nasazení PKD, zmenšuje se v porovnání s běžným opracováním škodlivé maximum tažného napětí na povrchu. Vysokorychlostní frézování slitin mědi tedy na jedné straně zvyšuje hospodárnost redukci doby výroby, na druhé straně však též přispívá ke kvalitnějšímu povrchu a zlepšuje jakost výrobků.[2][3]



Obr.9: Příklad obrábění měděné elektrody

### 2.2.3 Obrobitelnost grafitu

Grafit je velmi vhodný k opracování tradičními metodami, ale přesto výroba vhodných elektrod pro elektroerozi není snadná, protože tento materiál se chová opačným způsobem v závislosti na hustotě a na jemnosti granulace. Grafit má ve skutečnosti hustotu, která je variabilní vůči tlaku, jímž jsou stlačeny bloky, z nichž je grafit složen. Hustota má vliv na izotropní a anizotropní vlastnosti tohoto materiálu. Izotropie spočívá v chování, jež je indiferentní vůči zvolenému směru, přičemž anizotropie má odlišné vlastnosti pro různé směry. Elektrická vodivost, která má primární důležitost v dané elektrodě, může být dokonce rozpuštěna podél osy vůči jiné ose. Za účelem vyloučení tohoto problému je třeba používat izotropní grafit, tedy grafit o větší hustotě. Při použití anizotropního grafitu, tedy grafitu o menší hustotě, se získá větší opotřebování, ale i větší odebrání materiálu z obrobku. Z tohoto důvodu je vhodné používat grafit o menší hustotě, s cílem získat větší úběr materiálu z obrobku. Pokud je zapotřebí opracovávat tvary s ostrými hranami, je nutné použít grafit o vysoké hustotě. Čím jemnější granulace grafitu, tím se dá dosáhnout menší drsnosti povrchu. Grafit s jemnou granulací je také výhodné použít při opracování komplikovaných tvarů díky lepší těsnosti na hranách.

Při obrábění grafitu jsou vhodné nástroje z tvrdých kovů, jako jsou například rychlořezná ocel, karbid z wolframu (K10) nebo diamantem povlakovaný kov. Volba materiálu k použití pro obrábění ovlivňuje řeznou geometrii, stejně jako i rychlost řezání. Úhel řezu by se měl přibližovat k  $0^\circ$  a v každém případě to musí být úhel kladný, kdežto úhel hřbetu se musí nacházet kolem  $9^\circ$ . Životnost nástroje je především ovlivněna abrazivními vlastnostmi grafitu. Pro maximální využití nástrojů a efektivitu obrábění je vhodné volit co nejvyšší posuv na zub, při hrubování a zvláště pak dokončování by tato hodnota neměla klesnout pod 0,2 mm. Řezná rychlost se pohybuje kolem 125 a 150 m/min při soustružení a mezi 75 a 150 m/min při frézování. Použití grafitu je velmi

výhodné při výrobě trojrozměrných elektrod, protože zde můžeme aplikovat vysoké řezné rychlosti a dosáhnout tak až 10x kratšího času obrábění než při použití mědi. Diamantem povlakované nástroje jsou výhodné pro výrobu elektrod v sérii, s tím že potřebují úhel hřbetu i řeznou rychlost vyšší. Při volbě těchto materiálů se dosahuje lepší úrovně přesnosti, kvality povrchu i životnosti takto získané elektrody.

Bloky z grafitu, snadněji dosažitelné na trhu, se mohou redukovat na požadované rozměry pomocí pásové pily. Další možným způsobem je nalepování více grafitových bloků, které jsou již k dispozici, použitím vodivého lepidla, nebo vložením kovových prvků pro zlepšení elektrické vodivosti. Grafit je snadno opracovatelný mechanickými metodami a je na rozdíl od mědi nenáchylný na deformace a na tepelné výkyvy. Specifická váha grafitu je značně nižší než mědi, a umožňuje realizaci elektrod o značných rozměrech, při poměrně nízké hmotnosti. Grafit je možno zpracovávat na všech obráběcích strojích (konvenčních i nekonvenčních), a to s vysokou přesností. Obrobky si uchovávají svoji rozměrovou stabilitu jak během, tak i po odebrání třísek a okrajové oblasti opracovaných povrchů nepodléhají jakékoli proměně, pokud se týká struktury i charakteristik materiálu.

Grafit se musí zpracovávat za sucha, v žádném případě se nedoporučuje použití emulzí pro vrtání a řezání, jelikož by grafitový prach vytvořil s emulzí brusnou pastu, která by měla značný vliv na opotřebení nástroje a na výslednou kvalitu povrchu. Při obrábění grafitu musí být vhodně navrženo odsávání. Pokud se zde nenachází, je možno použít provizorního řešení, tedy položit grafit dovnitř dielektrika elektroerozivního stroje po dobu několika hodin, tím se sníží vytváření prachu.[5]

#### **2.2.4 Obrobitelnost sloučenin wolframu a mědi**

Tyto materiálové kompozice se používají pro speciální účely hloubení úzkých drážek a otvorů, pro jemné práce s obzvláště nepříjemnými podmínkami proudění dielektrické kapaliny. Jejich cena ve srovnání s měděnou elektrodou je 18x až 100x vyšší. U těchto velmi nákladných elektrod se nejedná o pravé slitiny, podíl wolframu se pohybuje v rozmezí 50 % až 80 %. Tento vysoký podíl wolframu znamená 3krát až 5krát menší opotřebení elektrody oproti měděné elektrodě. Tyto slitiny nemohou být tvarovány po slinování pro svoji velkou křehkost. Používají se pro obrábění hlubokých drážek z ocelí, slinutých karbidů a karbidů wolframu. Nástrojová elektroda se vyrábí podle svojí tvarové složitosti některým z obvyklých způsobů jako přesné lití a lití pod tlakem. Jako dokončovací operace na požadovaný rozměr se volí soustružení, frézování, broušení.

### 3. Výroba elektrod v podniku

#### 3.1 Technologie výroby

Proces konstrukce a výroba elektrod pro elektroerozivní obrábění se skládá z několika částí. Výroba elektrod závisí na řadě faktorů, vycházejících z CAD/CAM softwarového, nástrojového a strojního vybavení výrobního podniku, na výběru materiálu elektrod a upínacího systému a držáku elektrod.

Postup výroby elektrod pro elektroerozivní obrábění vychází z tvaru následného výrobku, například formy pro vstřikování plastů, formy pro lití, tvářecí zápustky. Z tvarů, které by byly obtížně obrobitelné třískovým obráběním (frézováním, soustružením, bodovým broušením), je materiál odebírán pomocí elektrody za pomoci proudu a dielektrické kapaliny. Elektroda má negativní tvar obrobené plochy, který je prostřednictvím výbojů kopírován do obrobku.

Nejdříve je třeba zpracovat technologický postup výroby elektrod dle objednávky na výrobu formy. Hlavička technologického postupu obsahuje číslo zakázky, číslo objednávky, typ, plánovaný termín, pozici vložky, číslo výkresu, množství elektrod, hrubý rozměr, materiál, jméno technologa. Dále jednotlivé operace obsahují identifikační číslo operace, číslo pracoviště, plánovaný termín, označení kooperace, výkaz práce v hodinách, počet kusů, jméno pracovníka, označení směny, osobní číslo pracovníka.

Jednotlivé operace technologického postupu:

- okorigovat elektrody, zajistit materiál
- připravit materiál dle kusovníku
- zúhlovat hotově osazení
- upevnit elektrody na držáky
- frézovat elektrody dle výkresu a informací VA, označit
- odhrotit
- provést kontrolu
- předat na VA

Po obdržení z oddělení plánování provede odpovědný pracovník technologie její roztřídění dle typu zakázky a termínu zhotovení. Následně pak řídí její zadávání jednotlivým technologům. Technolog si překontroluje správnost objednávky, zakázkový list, výkres a kusovník. Obsahuje - li dokumentace všechny tyto náležitosti, může se přistoupit k tvorbě vlastního technologického postupu.

Technologický postup se vytváří v informačním systému firmy. Nejprve je nutno vytvořit kusovník. V případě opakované výroby se kusovník i technologický postup zkopíruje z archivu technologie, vytvořeného v informačním systému.

Po pečlivém prostudování výkresu jej technolog barevně označí dle různých způsobů obrábění konkrétních ploch. Pokud jsou ve výkresové dokumentaci nejasnosti bránící úspěšnému zhotovení dílce, neprodleně provede dotaz k zadavateli a zajistí jejich opravu. V případě ručních neautorizovaných změn ověří jejich správnost u zadavatele a doplněním jeho jména, svého podpisu a data změnu autorizuje.

Pro každou pozici (výkres) vytvoří technolog samostatný technologický postup. Poté zkontroluje, zda požadované tepelné zpracování a povrchová úprava (pokud je vyžadována) dané pozice (výkresu) patří mezi standardy.

Tvorbu technologického postupu technolog začne optimálním rozvržením pracovních operací. Každá operace musí obsahovat podrobnější rozpis úkonů na daném pracovišti, musí mít rozplánován termín dokončení a je časově onormována. Popis způsobu a provedení výpočtu N/h je normován.

Hotový technologický postup musí technolog v informačním systému potvrdit do výroby. K jednotlivým operacím jsou automaticky přiřazena čísla dokladů, dle kterých se potom ve výrobě zadává a ukončuje daná operace.

V případě potřeby technolog navrhne konstrukci a zajistí výrobu technologických přípravků, objedná v konstrukčním oddělení šablony nebo výkresy elektrod. Postup objednání je stanoven příslušnými pracovními instrukcemi.

Zpracované podklady technolog předá osobě určené k přípravě kompletní dokumentace a její distribuci do výroby. Tato osoba (pracovník oddělení plánování) provede tisk výrobní dokumentace, jejímž obsahem je kusovník, technologický postup a rozměrový protokol.

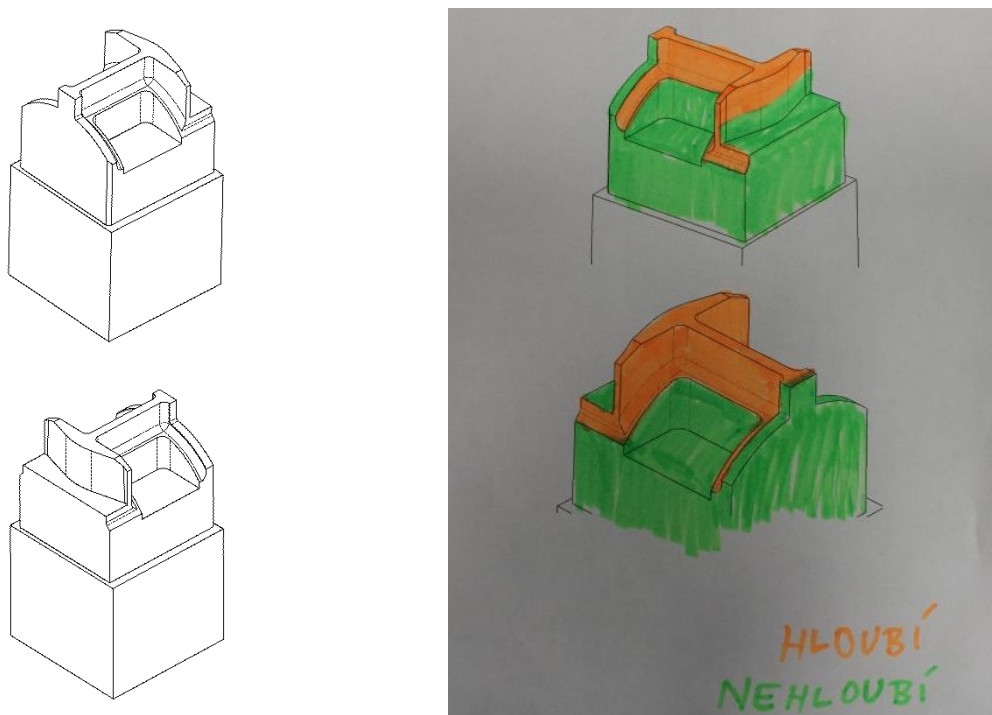
### **3.2 Programování obrábění**

Ve firmě je určen programátor, který se úzce specializuje na tvorbu obráběcích programů elektrod. V centrálním systému firmy si vyhledá elektrody, které už prošly konstrukcí a technologií a na které je vytvořen platný model, výkres a technologický postup s určením celkového času výroby. Programátor vytváří program v systému Pro/ENGINEER, ve kterém je také zkonstruován model elektrody.

S ohledem na materiál obrobku vybírá vhodné nástroje z katalogu firmy InovaTools, který disponuje vhodnými vysokorychlostními nástroji pro obrábění mědi, grafitu i slitin wolframu. Strategie obrábění a řezné podmínky se volí s ohledem na požadovanou přesnost výroby, tvar elektrody a výslednou drsnost obrobků. Doporučené řezné podmínky jsou pro programátora v mnoha případech pouze informativní, protože požadovaná přesnost výroby je mnohdy v tisícinách milimetrů.

Programátor proto musí ze svých zkušeností vytvořit program tak, aby byl proces optimální a zároveň se dosáhlo požadované přesnosti v co možná nejkratším obráběcím

čase. Výsledkem práce je program, který nahraje do centrálního systému a seřizovací list, na kterém jsou uvedeny základní informace potřebné pro zhotovení dílu, jako jsou nástroje, řezné podmínky, nulový bod. Dále vytiskne část výkresu elektrody a označí zřetelné funkční plochy (plochy, které budou hloubit) a plochy konstrukční (které nehlobí).



Obr.10: Označení funkčních a konstrukčních ploch

### 3.3 Materiál a polotovar

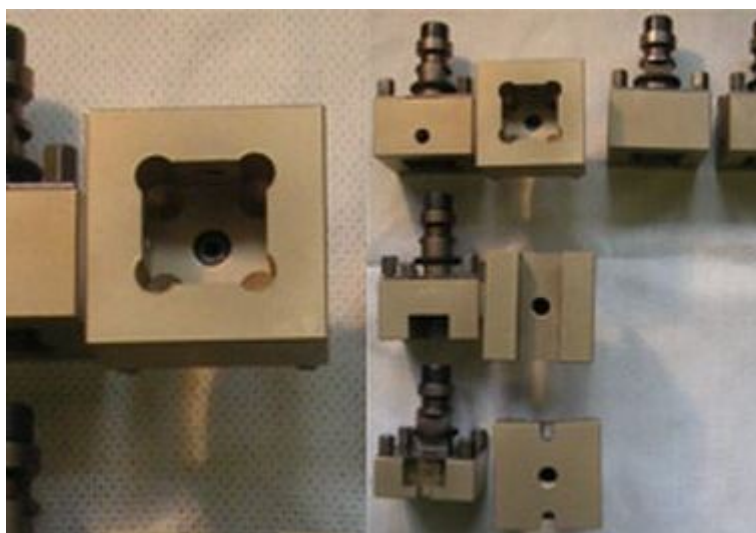
Na tvar elektrody, pokud není čtverec nebo obdélník, se přisadí ve směru hloubení rámeček ve tvaru čtverce nebo obdélníku nebo kruhu. Musí být vždy větší než tvar, a to na každou stranu alespoň o 2 mm, vysoký 5 mm, výjimečně 10 mm a více při usazení elektrody našikmo. Rámeček se opatří základnami. Na rámeček se přisadí podstava pro upínání elektrody o rozměrech 25x25. Pokud je elektroda, nebo její rámeček větší než výše jmenovaná podstava, vytvoří se podstava větší na délku i šířku podle potřeby a na výšku 25 mm. Podstava může mít tvar obdélníků, čtverce nebo kruhu. Na horní plochu podstavy se umístí 2xM6 do hloubky 12 mm na rozteči 40  $\pm 0,1$ , tak aby byly v jednom směru na nulové hodnotě s pomyslnou rovinou, která prochází středem elektrody. Po dohodě s předákem pracoviště elektroerozivního obrábění lze použít i podstavu  $\varnothing 40$  x nekonkrétní výška (tento průměr lze nahradit i jinou velikostí  $\varnothing$ , nebo lze nahradit i čtvercem na tento, či menší se přisadí hranol 25 x 25 x nekonkrétní výška. Výšky se



namodelují nějak vysoké s tím, že na výkres je nekótujeme. Do výkresu je dosadí pracovník elektroerozivního obrábění. Pokud je rozměr tvaru elektrody (včetně rámečku) o málo větší, než podstava 25 x 25 a rozměrově je zbytečné volit podstavu, pak se vymodeluje podstava větší, než rámeček do výšky asi 10 mm a na ni se posadí hranol o rozměru 20 x 13 x délka o stejném rozměru jako je délka podstavy.

Ve firmě INA se používají upínací prvky a držáky elektrod firmy Erowa. Tyto upínací prvky (palety) zaručují přesnost počátku souřadného systému elektrody v řádu tisícín milimetru i při opětovné demontáži elektrody z držáku. Tyto držáky lze totiž uplatnit i na obráběcím stroji při obrábění elektrody, poté ji z držáku odepnout a následně na vyjiskřovacím stroji opět upnout bez dalšího vyrovnávání. V případě upínacího prvku firmy Erowa polohu souřadného systému zaručuje nalisovaný kříž s přesností 0,001 mm. Dalšími výrobci upínacích prvků jsou například firmy W-Technology a 3R.

Polotovary mědi na výrobu elektrod jsou  $\varnothing 45 \times 50$ ,  $\varnothing 50 \times 50$ ,  $\varnothing 60 \times 50$ ,  $\varnothing 70 \times 50$ ,  $\varnothing 80 \times 50$ ,  $\varnothing 100 \times 50$ ,  $\varnothing 125 \times 50$ ,  $\varnothing 140 \times 50$ . Podstava by měla přesahovat rámeček na všechny strany nejméně o 2 mm. Pouze v krajních případech toto není podmínkou. Pro orientaci polohy nepravidelného hloubeného tvaru na elektrodě se srazí na rámečku hrana, nebo se na kulatině vytvoří ploška pro srovnání, a to blízko hloubeného tvaru, nebo se vytvoří drážka co nejdelší a nejširší uprostřed hloubeného tvaru. Po dohodě s předákem pracoviště elektroerozivního obrábění se někdy nevytváří ani rámeček s podstavou, ale vytáhne se hloubený tvar nad alespoň 10 mm.



Obr.11: Upínací systém Erowa



### 3.4 CNC frézování

#### 3.4.1 Vysokorychlostní obráběcí centra

Firma INA Lanškroun s.r.o. používá pro frézování elektrod vysokorychlostní obráběcí centra RXP 500 a RFM 600 firmy Röders. Oba stroje jsou plně využívány pro výrobu grafitových, měděných a wirbalitových elektrod.

Řídicí systém a stroj představují jeden celek. Do systému byla integrována většina na trhu dostupných upínání. Stroje disponují standardně systémem RödersCAM pro 2D programování, se kterým je možné programovat standardní úlohy pomocí využití cyklů přímo v prostředí řídicího systému, aniž by bylo nutné přecházet do systému CAM. Stroje jsou vybaveny odsávacím systémem a patentovaným systémem těsnění pro frézování grafitu.

Stroje Röders jsou sestaveny jako portálové frézovací centrum. Mají vedení s kuličkovým tažným šroubem. Jejich prvky jsou chlazeny vodou, což zaručuje udržování konstantní pracovní teploty. Celkově tuhá konstrukce stroje zaručuje nízké opotřebení nástrojů a minimální vibrace stroje při dokončovacím i hrubovacím obrábění. Stroje jsou zcela uzavřeny a zvukově izolovány kabinou s prostorným oknem z bezpečnostního skla. Frézovací centra jsou vybavena vlastním speciálně vyvinutým řídicím systémem Röders RMS-Commander, běžícím pod systémem Windows. Tento řídicí systém umožňuje co nejjednodušší programování 3D obrábění, komunikuje přes rozhraní ISO s nejběžněji používanými CAD/CAM systémy.

Stroje Röders jsou vybaveny vysoce dynamickou rotační osou a torzním motorem s minimalizovanou obvodovou hřízivostí, což umožňuje u všech nabízených typů při zachování výrobcem zaručené přesnosti obrábění dosáhnout rychlostí u pracovního posuvu 30 000 mm·min<sup>-1</sup> při obrábění ve tvaru.

Vysoce precizní opracování materiálů, jako je grafit, měď, hliník či kalená ocel, je zajištěno pečlivým výběrem vhodných vřeten. Ta pak umožňují řezání závitů, vrtání a hrubovací práce i u vysoce abrazivních ocelí. Obrábění je možné za sucha, s mlhou nebo pod emulzí či řezným olejem.

Stroje Röders jsou v oblasti obrábění grafitu upraveny tak, aby po připojení na filtrační zařízení bylo možné obrábět grafit, a tak je zabezpečena ochrana potřebných částí stroje před znečištěním. Jsou vybaveny přívody stlačeného vzduchu tak, které vytvářejí optimální přetlak v pracovním prostoru. Součástí je také automatické čištění filtru.

## Základní parametry stroje RXP 500

<b>Posuv</b>		
Rychlost posuvu	mm/min	0-40 000
<b>Pracovní vřeteno</b>		
Rozsah otáček max.	ot/min	42 000
Výkon pohonu	kW	14
<b>Výměník nástrojů</b>		
Počet nástrojů v zásobníku		41 + sonda
Max. výška nástroje	mm	340
<b>Provedení stolu</b>		
Rozměry stolu	mm	550 x 450
Obráběcí rozsah	mm	500 x 400 x 240
Zatížení stolu	kg	400
<b>Hmotnost stroje</b>	kg	5500



Obr. 12: Obráběcí centrum RXP 500

## Základní parametry stroje RFM 600 DSF

<b>Posuv</b>		
Rychlost posuvu	mm/min	0-30 000
<b>Pracovní vřeteno</b>		
Rozsah otáček max.	ot/min	42 000
Výkon pohonu	kW	14
<b>Výměník nástrojů</b>		
Počet nástrojů v zásobníku		82 + sonda
Max. výška nástroje	mm	350
<b>Provedení stolu</b>		
Rozměry stolu	mm	Ø 405
Obráběcí rozsah	mm	300 x 400 x 300
Zatížení stolu	kg	125
<b>Hmotnost stroje</b>	kg	7000



Obr. 13: Obráběcí centrum RFM 600 DSF

### 3.4.2 Vysokorychlostní obráběcí nástroje

Speciálně vyvinutý diamantový povlak krystalické diamantové vrstvy (DIA DUR), vyvinutý programem Diamond InovaTools se ideálně hodí pro obrábění grafitu, sklolaminátu a měděných materiálů. Tato vrstva má vynikající přilnavost k slinutému karbidu, speciálně vybraného tak, aby bylo dosaženo nejdelší životnosti. Kromě toho je tato vrstva velmi odolná proti oděru a nevznikají na ní typické vady pro CVD povlaky. Tím se zvyšuje efektivita obrábění a snižují se náklady.[15]

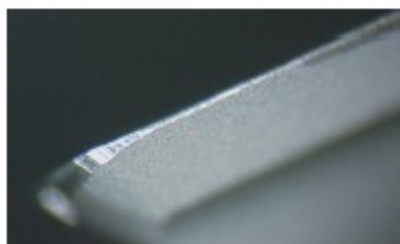
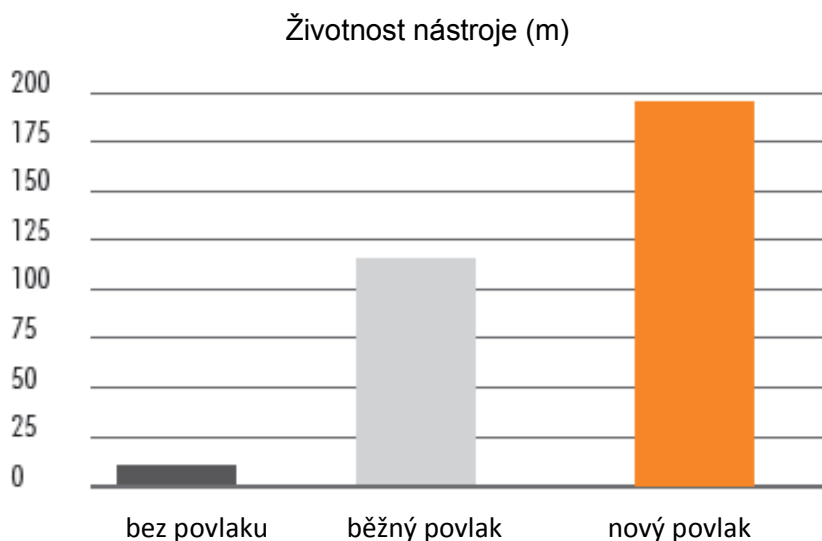
Život nástroje při frézování grafitu

Parametry

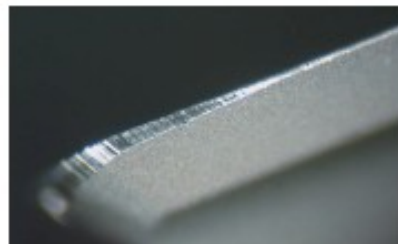
- Materiál nástroje : GK 05
- Nástroj: fréza, Ø 12 mm
- Materiál obrobku: grafit EK85
- Typ obrábění: frézování
- Chlazení: suché / vzduch
- Zkoumané kritérium: opotřebení nástroje



Obr. 14: Katalog nástrojů InovaTools [15]



Obr.15: Opotřebení břitu - nový povlak




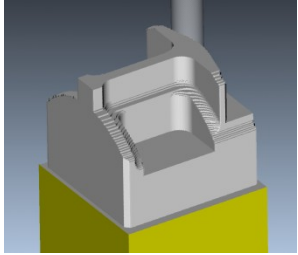
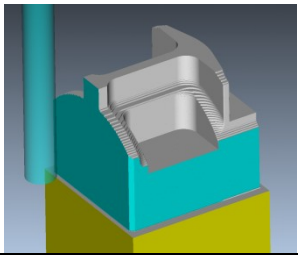
Obr.16: Opotřebení břitu - běžný povlak

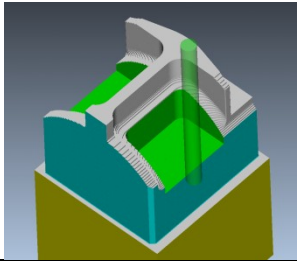
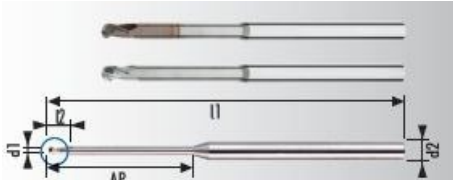
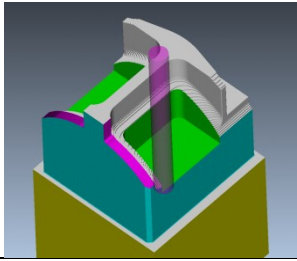
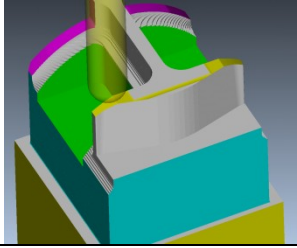
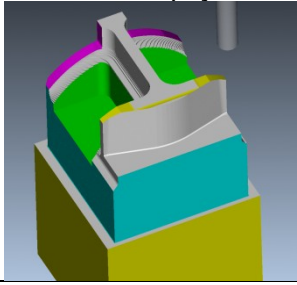
## 4. Diskuse experimentu

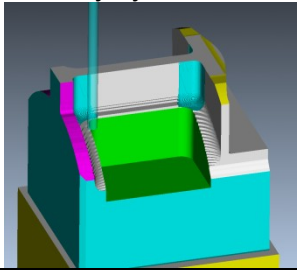
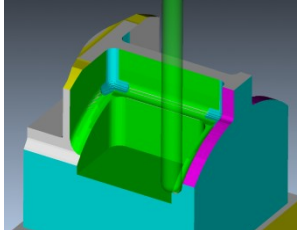
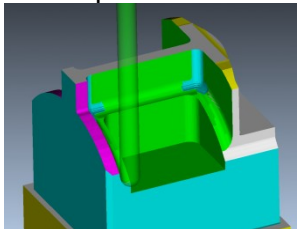
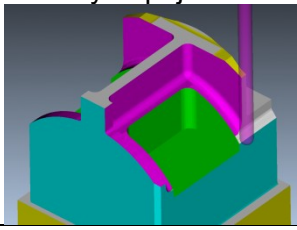
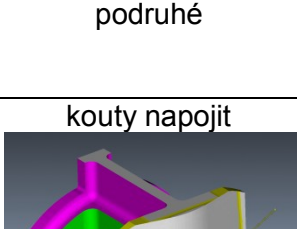
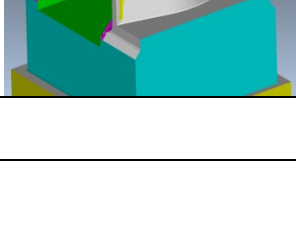
### 4.1 Stávající technologie

Nejdříve se stáhl vytvořený obráběcí program z centrálního systému do pětiosého obráběcího centra RFM 600 DSF. Následně se vybraly nástroje vhodné na obrábění mědi s povlakem TiAlCN podle seřizovacího listu, přičemž dva z nich se musely odlehčit na požadovanou délku. Poté se upnuly do držáků a umístily se do zásobníku nástrojů na stanovené pozice. Dále se zkontroloval program a bylo nutné vytvořit program na zarovnání vrchní plochy. Polotovár o rozměrech 42 x 42 x 72 mm se upnul i s držákem Erowa na pracovní stůl stroje. Následně se našel nulový bod ve středu obrobku. Obrábění součásti probíhalo dle vytvořeného NC programu sledem jednotlivých operací.

Sled jednotlivých operací

číslo operace	nástroj	druh operace	řezné parametry	čas (min)
1	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, ostrá Ø 8 	hrubování tvaru 	$v_c = 251$ $v_f = 3000$	27,23
2	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, ostrá Ø 8	vrchní plocha hrubování	$v_c = 251$ $v_f = 3000$	1,21
3	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, ostrá Ø 8	dokončení obvodu 	$v_c = 251$ $v_f = 2000$	9,37
4	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, ostrá Ø 8	vrchní plocha dokončení	$v_c = 251$ $v_f = 2000$	0,21
5	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, ostrá Ø 8	obvod podruhé	$v_c = 251$ $v_f = 2000$	8,13

6	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, ostrá $\varnothing 4$	Odlehčení 	$v_c = 176$ $v_f = 1500$	11,33
7	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, rádiusová $\varnothing 5 R0,3$ 	odlehčení 2 	$v_c = 188$ $v_f = 1500$	4,25
8	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, rádiusová $\varnothing 5 R0,3$	odlehčení 2 - podruhé	$v_c = 188$ $v_f = 1500$	4,25
9	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, rádiusová $\varnothing 5 R0,3$	tvar dokončení 	$v_c = 188$ $v_f = 1500$	11
10	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, rádiusová $\varnothing 5 R0,3$	tvar dokončení – podruhé	$v_c = 188$ $v_f = 1500$	11
11	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, kulová $\varnothing 8 R4$	vrch napojit 	$v_c = 251$ $v_f = 2000$	1
12	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, kulová $\varnothing 8 R4$	vrch napojit	$v_c = 251$ $v_f = 2000$	1

13	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, ostrá $\varnothing 2$	kouty vyhrubovat 	$v_c = 94$ $v_f = 1500$	25
14	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, kulová $\varnothing 4 R 2$	boky dohrubovat 	$v_c = 201$ $v_f = 1600$	8,45
15	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, kulová $\varnothing 4 R 2$	boky dohrubovat – podruhé 	$v_c = 201$ $v_f = 1600$	9
16	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, kulová $\varnothing 3 R 1,5$	boky napojit dno 	$v_c = 151$ $v_f = 1400$	38
17	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, kulová $\varnothing 3 R 1,5$	boky napojit dno - podruhé 	$v_c = 151$ $v_f = 1400$	38
18	VHM – minifréza – extra dlouhý rozsah, kulová $\varnothing 0,4 R 0,2$	kouty napojit 	$v_c = 38$ $v_f = 1000$	22
celkový čas				230,4



## 5. Možnosti zefektivnění výroby

Podstatou zefektivnění výroby je nepřetržité zdokonalování výrobního systému - vyšší úroveň techniky, technologie, organizace práce, výroby i řízení. Základem je rozumové zvládnutí výroby – racionalizace. Racionalizace spočívá v zavádění nových technických a organizačních opatření a zároveň ve vyloučení zbytečných ztrát a využití existujících rezerv.

Procesy výroby a míra odpovědnosti za jejich průběh jsou dány tržním základem naší ekonomiky, nutností soutěžit s konkurencí o postavení na trhu, díky progresivní podnikatelské politice manažerského týmu firmy a díky inovacím a rozvíjejícím se procesům. Jednou z cest jsou výrobové, technologické a organizační inovace. Náplň věcná, časová a prostorová struktura výroby je v praxi v každém podniku jiná. Ovlivňuje ji zejména složitost produktu, typ a charakter výroby, tradice podniku a jeho technické vybavení. Přípravou výroby rozumíme soubor technicko-ekonomických činností v podniku, jehož úkolem je vypracovat efektivní řešení výrobku, způsobem výroby, její organizace a vybavení. Schválené řešení ve formě technicko-ekonomické dokumentace má zabezpečit, že výrobek bude konkurenceschopný a průběh procesu přípravy výroby, vlastní výrobní proces i užívání výrobku bude efektivní. [9]

Průzkumy z praxe ukazují, že čekací doby tvoří 80 až 90 procent z celkové průběžné doby výroby. Využití systému je vyjádřeno vztahem: čas opracování/čas opracování + čekání stroje. Maximum využití systému dosáhneme, jestliže čekání stroje je nulové. Průběžná doba (čas) se rovná součtu času opracování + čas přepravy + čekání výrobního úkolu. Minimum průběžné doby dosáhneme, jestliže čekání výrobního úkolu se rovná nule. Výrobní systémy by měli být pružnější s ohledem na: počet typů opracovaných komponent, různou posloupnost opracování jednotlivých výrobních dávek, velikost výrobních dávek. Tyto požadavky je třeba splnit při vysoké produktivitě práce a nízkých výrobních nákladech. V řešení rozporu mezi průběžnými dobami (požadavek pružnosti) a využitím systému, (požadavek minimalizace kapitálových investic do kapacit) je obsažen kompromis mezi pružností výroby na jedné straně a její hospodárností a produktivitou na straně druhé. Je zapotřebí správně definovat spektra součástí, které se budou vyrábět v daném výrobním systému, volit vhodně pružné, programovatelné výrobní prostředky (NC stroje, obráběcí centra, roboty, automaty, automaticky vedené vozíky apod.) a jejich vzájemné propojení informačním tokem (systém řízení výroby, sběr výrobních údajů, monitorování průběhu výroby, sestavit tým pracovníků).[8]

Optimalizace je proces hledání nejvhodnějšího (optimálního) řešení, nejkratší (optimální) cesty, nákup co možná nejlevnějšího a současně nejvyššího (optimálního) zboží.



Při optimalizaci měníme tzv. stavové proměnné optimalizovaného objektu a sledujeme, jaký vliv má změna těchto proměnných na výsledné parametry. Optimalizací rozumíme hledání takových hodnot stavových proměnných systému, které zajistí, že systém bude dosahovat požadovaných parametrů, nebo že se parametry systému budou co možná nejvíce blížit parametrům žadáním.

Základní nástroje zefektivnění:

- Optimalizace provádění pracovních operací
- Ergonomie pracoviště - uspořádání a vybavení pracoviště
- Technické úpravy pracovišť - přípravky, držáky, mechanismy
- Technologičnost konstrukce
- Uspořádání pracovišť

Základní postup zefektivnění:

- Poznání (analýza) pracovního systému
- Posouzení funkce současného pracovního systému
- Generování racionalizačních opatření
- Realizace opatření
- Vyhodnocení přínosů [9]



Obr.17: Cíle racionalizace v podniku [9]

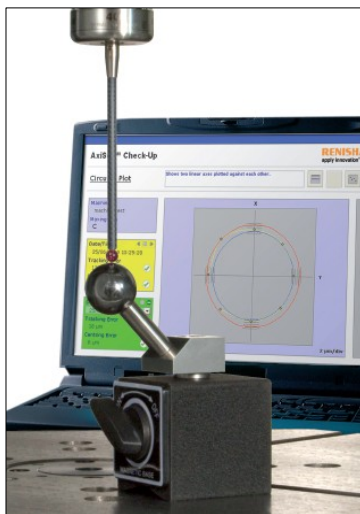
## 5.1 Kalibrace stroje

Jako jednou z možností optimalizace procesu se jeví kalibrace stroje, analýza provozních vlastností rotačních os těchto strojů a rozpoznávání problémů způsobených nesprávným nastavením stroje, kolizemi nebo opotřebením pomocí měřících systémů firmy Renishaw. Systém AxiSet™ Check-Up umožňuje rychlou a automatizovanou kontrolu rotačních os na 5osých strojích. Bezdrátový systém Ballbar QC20-W s vestaveným délkovým snímačem umožňuje rychlý monitoring stavu lineárních os stroje.

AxiSet™ Check-Up je kompatibilní s běžnými pětiosými a víceosými stroji a provádí rychlou a přesnou analýzu stavu středů otáčení rotačních os. Jako referenční prvek pro měření se používá jednoduchá kalibrační koule namontovaná na magnetickém stojánu. Dotyková sonda je poté naprogramována pomocí dodaného přizpůsobeného makro softwaru tak, aby automaticky prováděla referenční měření kolem koule. Uživatelé mají nad procesem plnou kontrolu a mohou definovat svoje vlastní testovací úhly, aby bylo zaručeno, že stroje jsou testovány v kritických směrech. Pro zajištění maximální přesnosti testování se doporučuje používat vysoce přesné tenzometrické sondy. Mezi ně patří nejnovější generace sond RENGAGE™ i široce používaný model MP700. Dalším doplňkem je kalibrovaná zkušební tyč, která zajišťuje, aby měření systémem AxiSet™ byla sledovatelná a srovnatelná s nastaveními provedenými výrobcí obráběcích strojů.

Tento nástroj se snadno používá a zajišťuje, že doba jeho přípravy je minimální. Ve většině případů se ani nevyžaduje odstranění přípravků nebo dílů.

Rychlé kontroly vyrovnaní a polohování probíhají na základě zkušebního testu a monitorují chování celého stroje v průběhu času. Díky softwarovým měřicím cyklům a speciálnímu kalibračnímu nástroji, kterými je vybaven, nabízí tento systém grafické znázornění přesnosti víceosých strojů. Rozbor přesnosti je znázorněn graficky pomocí softwaru. [11]



Obr. 18: Kalibrační systém AxiSet™ Check-Up [11]

Systém Ballbar a souprava ballbaru QC20-W obsahuje přesný lineární snímač. Používá se k měření změn poloměru, při otáčení ballbaru kolem pevného bodu. Tyto údaje se používají k výpočtu celkových naměřených hodnot přesnosti obrábění (kruhovitost, odchylka kruhovitosti) na CNC obráběcích strojích, v souladu s mezinárodními normami. Systémový software také poskytuje podrobnou diagnózu příspěvků jednotlivých zdrojů chyb. Data jsou zobrazena graficky a také v číselném formátu, což podporuje diagnostiku. Zpracovávání signálů se provádí v ballbaru a data se přenášejí do vhodného počítače pomocí modulu Bluetooth® třídy 2.

Kalibrátor Zerodur® je dodáván se všemi soupravami QC20-W a používá se ke kalibraci délky ballbaru. Vyrábí se z materiálu, který má téměř nulový součinitel teplotní roztažnosti. Když se ballbar QC20-W používá s kalibrátorem Zerodur®, vypočítává absolutní chyby hodnot měřítka osy a radiální odchylky, jak to vyžadují normy ISO 230-4 a ASME B5.54/57. Software dále automaticky vypočítá toleranci polohy stroje. Hodnota tolerance polohy je odhadem plošné obousměrné polohové přesnosti stroje v oblasti zahrnuté do testu systémem Ballbar v podmínkách bez zatížení. Kalibrátor Zerodur® je schopen kalibrovat délky 100, 150 a 300 mm. Souprava pro malé poloměry obsahuje 50 mm kalibrátor Zerodur®.

Po sestavení ballbaru s různými kombinacemi prodlužovacích nástavců lze provádět testy o poloměru 100, 150, 250, 300, 400, 450, 550 a 600 mm. Kulové držáky nové konstrukce (včetně nového středového otočného čepu a prodlužovacího nástavce nástrojové misky) umožňují provádění testů 220° v rovinách procházejících osou středového otočného čepu. To znamená, že systémem ballbar se může testovat ve třech kolmých rovinách, aniž je nutné přemístit středový upínač, což urychluje testování, jsou-li prováděny testy s poloměrem větším než 150 mm, je požadováno běžné upnutí.[11]



Obr.19: Bezdrátový systém Ballbar QC20-W [11]

## 5.2 Volba nové moderní CNC vysokorychlostní frézky

Na trhu existuje velmi široká nabídka center pro vysokorychlostní obrábění jako jsou Deckel Maho, Ex-cell-o, Gildmeister, Grob, Heckert, Chiron Vision, Hermle, Kitamura, Liechti, Makino, Matec, Mazak, Mikromat, Mikron, Mori Seiki, Röders, Stama, Schwäbische Werkzeugmaschinen, Yasda. Běžné dynamické parametry se pohybují pro lineární osy v oblasti posuvových rychlostí 40 až 60 m·min<sup>-1</sup> (špičkově 120 m·min<sup>-1</sup>). Vřetena dosahují maximálních otáček 15 000 až 30 000 min<sup>-1</sup> (špičkově až 60 000 min<sup>-1</sup>, elektrovřetena a pneumatická vřetena až 90 000 min<sup>-1</sup>). Podle přání zákazníka nabízejí výrobci různé druhy vřeten podle druhů výroby.

Pro zefektivnění výroby elektrod se nabízí možnost využití speciálních strojů pro obrábění nástrojů s velmi malými průměry, převážně pro výrobu detailů elektrod pro EDM – Röders a Chiron. Tyto vysokorychlostní stroje bývají standardně vybaveny vřetenem s minimálními otáčkami 42 000 min<sup>-1</sup>. Další vhodnou volbou je stroj s jednoduchou rovinnou paralelní kinematikou umožňující použít vysoká zrychlení (30 m·s<sup>-2</sup>) – Chiron Vision.

Využijeme - li nabídky firmy Röders, jsou zde dvě vysokorychlostní frézovací pětiosá centra speciálně vhodná pro mikroobrábění - obrábění elektrod a malých forem RXP 400 DS a RXP 400 DSC. Stroj RXP 400 DSC má tyto důležité specifikace: rychlost posuvu 42 000 mm·min<sup>-1</sup> a otáčky vřetena 50 000 min<sup>-1</sup>.



Obr.20: Frézovací centrum RXP 400 DSC [12]

Využijeme - li nabídky firmy CHIRON, která patří mezi nejvýznamnější světové výrobce CNC-řízených vertikálních obráběcích center, je zde vysokorychlostní pětiosé frézovací centrum konstrukční řady 08 MAGNUM. Tyto stroje disponují lineárními pohony s vektorovým zrychlením 5,2 g, TORQUE-motory v otočném dvouosém stole, synchronní vřeteno s kuželem HSK-A 40, časem tříska-tříška ca. 1,2 s a provedením s pevným stolem nebo s výměnným paletovým systémem.



Obr.21: Frézovací centrum 08 MAGNUM [13]

Využijeme – li nabídky firmy Deckel Maho, jako vhodný stroj se jeví vysokorychlostní frézovací centrum NMV 1500 DCG. Tento stroj disponuje vřetenem s maximálními otáčkami až  $60\,000\text{ min}^{-1}$ .



Obr.22: Frézovací centrum NMV 1500 DCG [14]

### 5.3 Volba nástrojů vzhledem k obrobitelnosti

Pro frézování mědi je navrhována skupina monolitních stopkových fréz s CrN otěruvzdorným povlakem. Povlaky typu CrN představují nejlepší volbu u aplikací, kde je důležitá abraze, koroze a oxidační odolnost. CrN vykazuje vynikající vlastnosti pro smyk při omezeném mazání. Vysoká tvrdost společně s velmi nízkou křehkostí umožňují vytváření i tlustších vrstev CrN povlaku s velmi dobrou adhezí.

Tato vlastnost přináší povlaku široké uplatnění a dodatečnou zvýšenou ochranu před opotřebením. CrN povlak se vyznačuje vysokou tvrdostí a přilnavostí k základnímu materiálu, která je vyšší než povlaků na bázi AlTiN. Právě tyto vlastnosti umožňují v porovnání s dřívější technologií povlakování zvýšit odolnost nástroje proti opotřebení a prodloužit jeho trvanlivost. Výsledkem je, že si nástroj udrží ideální rádius ostří (0,015 - 0,02 mm) po delší dobu, což je základní předpoklad pro obrábění mědi. K úspěšnému průběhu řezání frézami s CrN povlakem přispívá i mazací a adhezní chování povlaku při vysokých rychlostech, což se jeví jako velmi výhodné při využití HSC obrábění. To se příznivě projevuje jak ve zvýšení trvanlivosti, tak i ve výborné kvalitě obrobeného povrchu.

Jednou z možností použití vhodných vysokorychlostních fréz jsou nástroje firmy SECO. Její frézy skupiny Tornado jsou výsledkem nepřetržitého výzkumu a jsou nejlepší možnou kombinací kvality materiálu, geometrie a povlaků, v závislosti na obráběném materiálu. Jako nejvhodnější se jeví povlak s označením Siron-A, složením AlCrN. V nabídce je široké spektrum fréz vhodných pro obrábění mědi, navíc k tomuto standardnímu programu Seco® dodává speciální frézy, pokud nelze použít standardní rozsah nástrojů.



Obr.23: Nástroje SECO Tornado pro obrábění mědi [16]

Z mechanického pohledu se grafit zpracovává velmi dobře použitím nástrojů z tvrdých kovů, jako jsou například rychlořezná ocel, karbid wolframu nebo diamantovaný kov. Pro výrobu elektrody lze použít válcových stopkových nebo kulových tvrdokovových fréz bez povlaku nebo s povlakem TiAlN. Dále lze využít frézy osazené polykrystalickým diamantem (PKD) nebo nástroje s diamantovým povlakem.

Povlak DIAMOND firmy SECO chrání řeznou hranu frézy v rozsahu, který až desetkrát prodlužuje životnost nástroje v porovnání s konvenčním povlakem. Řada fréz Diamond zahrnuje velké množství geometrií, které jsou speciálně navrženy pro obrábění grafitu, a to v rozsahu průměrů  $\varnothing$  0.2 - 12.0 mm. Spojení tvrdého materiálu a povlaku Diamond zajišťuje výbornou přilnavost povlaku.

Frézy Mini pokrývají rozsah malých průměrů 0.1 mm až 2.0 mm. Jsou určeny pro výrobu velmi přesných a malých součástí, zaručující vysokou kvalitu obrobeného povrchu. Frézy jsou výsledkem nepřetržitého výzkumu a jsou optimální kombinací tvrdého materiálu, geometrie a povlaků, v závislosti na obráběném materiálu.



Obr.24: Frézy SECO pro obrábění grafitu [16]



Obr.25: Minifrézy SECO pro obrábění grafitu [16]



## 5.4 Celkové uspořádání výroby

Jednou z možností kontroly úrovně konané práce je právě snímek pracovního dne. Snímek pracovního dne spolu se snímkem operace patří mezi metody nepřetržitého bezprostředního studia spotřeby času. Jejich pomocí zjišťujeme skutečnou spotřebu času pracovníka, ale i výrobního zařízení.

Snímek pracovního dne je založen na metodě nepřetržitého pozorování, zaznamenávání a hodnocení spotřeby pracovního času pracovníka nebo skupiny pracovníků během celé směny.

Možnosti využití výsledků pozorování:

- Kvantifikace jednotlivých činností vyjádřených spotřebou času
- Rozbor struktury spotřeby pracovní doby
- Rozbor ztrátových časů podle příčin
- Vypracování výkonnostních křivek v průběhu celé směny

Metodika provádění snímku pracovního dne:

- Příprava k pozorování
- Vlastní pozorování, měření a zaznamenávání
- Vyhodnocení snímku pracovního dne

Při přípravě pozorování se vytvoří vhodné podmínky k nerušenému pozorování a získání reálných údajů o spotřebě pracovního času s ohledem na cíl zkoumání. Dále se uvádí jméno pracovníka, pracoviště, rozsah období a pozorovatel. Je důležité předem tento postup projednat s pracovním kolektivem a vysvětlit důvod ke snímkování a důležitost uvádět správné údaje. Zaměstnanci by měli pochopit, že zaměstnavatel nehledá způsoby k pronásledování lidí, ale k lepší organizaci práce. Je zapotřebí vhodným způsobem získat pracovní tým k tomu, aby se provedlo objektivní vyhodnocení, a získal se velmi cenný materiál, který může díky dalším postupům zvýšit pracovní výkon kolektivu a současně i docílit lepší motivace lidí k práci.

V druhé etapě se pozoruje činnost operátora na pracovišti po celou dobu směny, popisuje se druh činností do připraveného pozorovacího formuláře.

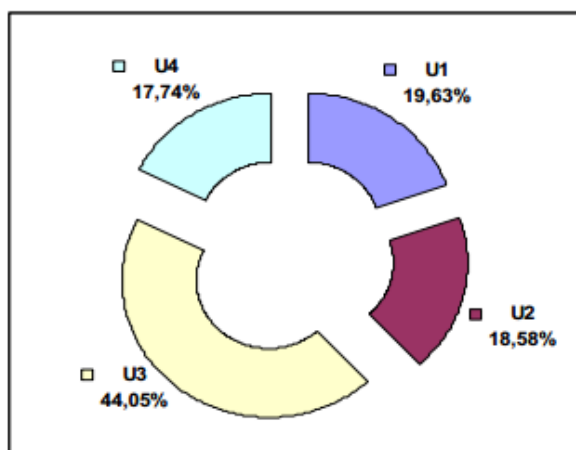
Při vyhodnocování se vypočítá z postupného času jednotlivý čas, každý jednotlivý čas zhodnotíme z hlediska obsahu činnosti, resp. nečinnosti. V dalším kroku probíhá sumarizace stejných činností do skutečné bilance spotřeby času směny. Skutečná bilance vyjadřuje, kolik času v minutách a procentech z času směny připadá na jednotlivé kategorie zkoumaného času pracovní směny.



S výsledkem se pak může nakládat dále v tom smyslu, že se hledají zbytečné ztrátové časy a upravují se podmínky. Je vhodné porovnat snímek i s tím, co je uvedeno v popisu práce příslušného pracovníka. Těchto snímků je vhodné provést více a dosáhnout tak větší objektivity. Zaměstnanci, kteří budou provádět snímkování svého pracovního dne, by měli dostat zpětnou vazbu a to ve vyhodnocení, které by mělo přinést pozitivní výsledky s poukázáním na zbytečné ztráty. Ne všechny informace je vhodné prezentovat před celým kolektivem. Pokud se zjistí, že je někdo přetížen, či nevytížen, je to úkol pro manažera, aby vhodně přeorganizoval pracovní úkoly. Pokud se zjistí, že někdo nezvládá díky ztrátovým časům své úkoly, ačkoliv jiný tytéž úkoly zvládá, je to záležitost pro osobní pohovor.

Od devadesátých let 20. století u nás existují firmy, které poskytují poradenskou činnost spolu se školicími centry a přípravou různých projektů. Jejich lektorské týmy se skládají z odborníků osvědčených akreditací jednotlivých ministerstev. Jejich projekty využívají především podnikatelské subjekty. Zaměřují se také na proces optimalizace a racionalizace, jasně definují ztrátové činnosti podniků, přímé procesní toky (materiálové, výrobní a jiné) a zaměřují se na přidanou hodnotu výroby. Používají různé metody, jako například ergonomie, MUDA, optimalizace procesních toků. Posuzují faktory pracovního prostředí, vyčíslují nedostatky. Mapují ve výrobním procesu skryté a zjevné plýtvání. Navrhují odstranění nedostatků. Také identifikují a vizualizují procesy související s optimalizovanou oblastí (toky materiálů a výrobků a doporučují zavádění změn.

Pokud se rozhodneme pro vypracování snímku pracovního dne, je možné využít služeb firem jako jsou EKOTERN servis s.r.o., Racionalizační agentura s.r.o., Business Excellence CONSULTING a jiných. [9] [10]



Obr.20: Graf využití času směny [9]

## 6. Zhodnocení možných nových řešení výroby

Nabízí se několik možností optimalizace výroby elektrod – kalibrace stroje, volba moderní CNC vysokorychlostní frézky, nových nástrojů a celkového uspořádání výroby.

Ke kalibraci stroje jsou navrhovány měřicí systémy firmy Renishaw - AxiSet™ Check-Up umožňující kontrolu rotačních os na pětiosých strojích a bezdrátový systém Ballbar QC20-W se snímačem umožňujícím monitoring stavu lineárních os obráběcího stroje.

Dále se nabízí možnost využití speciálních strojů vhodných pro výrobu elektrod pro EDM firem Röders, Chiron a Deckel Maho – vysokorychlostní frézovací pětiosá centra RXP 400 DS a RXP 400 DSC s maximálními otáčkami vřetena  $50\,000\text{ min}^{-1}$  a rychlostí posuvu  $42\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , dále frézovací centrum 08 MAGNUM s lineárním pohonem s vektorovým zrychlením až  $5,2\text{ g}$  a frézovací centrum NMV 1500 DCG s maximálními otáčkami vřetena  $60\,000\text{ min}^{-1}$ .

Pro volbu nových nástrojů pro frézování mědi je navrhována skupina monolitních stokových fréz s otěruvzdorným CrN povlakem firmy SECO skupiny TORNADO a s dlouhou udržitelností rádiusu ostří ideální pro obrábění mědi v rozmezí  $0,015 - 0,020\text{ mm}$  a také s mazacími a adhezivními vlastnostmi povlaku. Dále jsou navrhovány frézy minifrézy pro obrábění grafitu s povlakem DIAMOND firmy SECO, který chrání řeznou hranu frézy a prodlužuje životnost nástroje a má výbornou přilnavost

Zefektivnit výrobu lze také pomocí snímku pracovního dne spočívajícího v pozorování, zaznamenávání a hodnocení spotřeby potenciálu času pracovníků během celé směny. V této oblasti je možné využít služeb firem EKOTERN servis s.r.o., Racionalizační agentura s.r.o., Business Excellence CONSULTING a jiných.

Optimálního řešení zřejmě dosáhneme využitím kalibračních systémů a celkovým uspořádáním výroby s ohledem na zkrácení výrobních časů.

## 7. Závěr

Cílem této diplomové práce na téma Zefektivnění výroby elektrod pro elektroerozivní obrábění bylo najít možnosti optimalizace výroby. Firma INA Lanškroun, s.r.o. vyrábí elektrody pro elektroerozivní obrábění z grafitu, mědi a slitin mědi a wolframu. Používá vysokorychlostní nástroje firmy InovaTools a vysokorychlostní frézovací centra firmy Røeders RXP 500 a RFM 600 DSF.

Úvodní část této diplomové práce je zaměřena na obecnou charakteristiku daného problému. Další kapitola je věnována problematice obrábění elektrod pro elektroerozivní hloubení, využití vysokorychlostního obrábění, jednotlivým materiálům a jejich obrobitelnosti s výsledným porovnáním mechanických a fyzikálních vlastností. Dále je popsána výroba elektrod v podniku, technologie, programování, příprava materiálu a polotovaru a CNC frézování včetně jednotlivých operací, použitých nástrojů a výrobních časů.

Podstatnou částí diplomové práce je návrh možností optimalizace výroby spočívající v kalibraci stroje pomocí měřících systémů firmy Renishaw AxiSet™ Check-Up, který provádí rychlou a přesnou analýzu stavu středů otáčení rotačních os a rozbor přesnosti zobrazuje graficky pomocí softwaru. Dále systém Ballbar, který umožňuje rychlý monitoring stavu lineárních os stroje pomocí přesného lineárního snímače využívaného k měření změn poloměru při otáčení ballbaru kolem pevného bodu. Tyto údaje se aplikují při výpočtu celkových naměřených hodnot přesnosti obrábění (kruhovitost, odchylka kruhovitosti). Další možností optimalizace výroby je ve volbě nových CNC vysokorychlostních frézek firem Røeders, Chiron a Deckel Maho, které jsou navrženy k mikroobrábění, obrábění malých forem a elektrod. Tyto stroje dosahují vysokých posuvových rychlostí a otáček při zachování maximální přesnosti. Následující eventualitou pro optimalizaci jsou nové nástroje firmy SECO s povlaky typu CrN, které představují nejlepší volbu u aplikací, kde je důležitá odolnost proti abrazi, korozi a oxidaci. Důležitým krokem k zefektivnění může být také celkové uspořádání výroby pomocí vypracování snímku pracovního dne s možností využití služeb různých specializovaných firem.

## 8. Seznam použité literatury

- [1] SPENRATH, Norbert. *Technologische Aspekte zum Feinstdrehen von Kupferspiegeln*. Aachen, 1991. Dissertation. Technische Hochschule Aachen. Vedoucí práce W.König.
- [2] GREIF, Monika. *Hochgeschwindigkeitsfräsen von Kupferlegierungen: Technologische Einflussgrößen und Randzoneneigenschaften*. Darmstadt, 1991. Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt. Vedoucí práce H. Schulz.
- [3] PAGÁČ, Marek a Marek SADÍLEK. Konstrukce a výroba elektrod. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/konstrukce-a-vyroba-elektrod.html>
- [4] KALENDA, Jan. *Elektroerozivní obrábění při výrobě tvarových dutin: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 63 s., příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička
- [5] FALTUS, P. Obrábění grafitu. Ostrava: katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní VŠBTechnická univerzita Ostrava, 2009, 35 s. Bakalářská práce, vedoucí doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.
- [6] BRYCHTA, Josef. Problematika vysokorychlostního obrábění 3D ploch na přelomu tisíciletí. *Sborník Vědeckých prací Vysoké školy Báňské - Technické univerzity Ostrava: Řada strojní*. 2001, 47, 1/část1, s. 21 - 26.
- [7] SKOPEČEK, Tomáš; VODIČKA, Jaroslav; PAHL, Jörg-Peter; HERKNER, Volkmar. *Základy vysokorychlostního obrábění-HSC*. Západočeská univerzita v Plzni : Katedra technologie obrábění, 2005. 136 s. ISBN 80-7043-344-2.
- [8] MARIE JURINOVÁ A KOL. *Výrobní procesy řízené logistikou*. Brno: BizBooks, 2013. ISBN 978-80-265-0059-9.
- [9] NOVÁK, Josef a Pavlína ŠLAMPOVÁ. *Racionalizace výroby* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2007 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/414/racionalizace-vyroby.pdf>
- [10] EKOTERN servis. NOVOTNÝ, J. [online]. 2009. vyd. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.ekotern-servis.cz/snimek-pracovniho-dne>
- [11] Renishaw. [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/diagnostika-obrabeciho-stroje--12481>
- [12] Röders. [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.roeders.de/241-0-RXP400DSC.html>
- [13] Chiron. [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.octech.cz/obrabeci-centra/chiron/>
- [14] Deckel Maho. [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://de.dmgmorseiki.com/sites/products/de/fraesmaschinen/nmv1500dgc>
- [15] InovaTools. *Kompletní katalog nástrojů : monolitní nástroje rotační*. 2011.

- [16] SECOTools. *Kompletní katalog nástrojů : Nástroje rotační*. 2012.
- [17] MACHÁČEK, Jiří. HSC frézovací centra pro výrobu forem a elektrod. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/hsc-frezovaci-centra-pro-vyrobu-form-a-elektrod.html>
- [18] Automatizace výroby elektrod pro elektroerozivní obrábění. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/automatizace-vyroby-elektrod-pro-elektroerozivni-obrabeni.html>
- [19] SMOLÍK, Jan. Centra pro vysokorychlostní obrábění. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/centra-pro-vysokorychlostni-obrabeni.html>
- [20] Technologie práškové metalurgie. In: [online]. SOLID Brno [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.solidbrno.cz/technologie-praskova-metalurgie.php>
- [21] JIŘÍ KOHOUT A KOL. *TESLA Lanškroun 1946 - 1989: Vzpomínky pamětníků*. Lanškroun: Městské muzeum Lanškroun, 2007. ISBN 978-80-254-0835-3.

## **9. Seznam příloh**

**Příloha č.1:** Výkres elektrody

## **Poděkování**

Děkuji jednateli firmy INA Lanškroun, s.r.o. panu Ing. Janu Golářovi za umožnění zpracování této práce, technologům firmy panu Ing. Františku Pustinovi a Ing. Ondřeji Netolickému a dalším pracovníkům této společnosti za poskytnutí podkladů a za cenné rady při řešení dané problematiky.

Další poděkování bych chtěl věnovat vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Robertu Čepovi, Ph.D. za odborné vedení a rady při její tvorbě.